

## 오존(O<sub>3</sub>)/입상활성탄(GAC) 공정을 이용한 맛·냄새 유발물질과 유기물질의 제거특성 평가 Evaluation of Removal Characteristics of Taste and Odor causing Compounds and Organic matters using Ozone/Granular Activated Carbon(O<sub>3</sub>/GAC) Process

함영완<sup>1</sup> · 주영길<sup>1</sup> · 오효근<sup>2</sup> · 이병욱<sup>2</sup> · 김현기<sup>2</sup> · 김덕구<sup>3</sup> · 홍승관<sup>1\*</sup>

Young Wan Ham<sup>1</sup> · Young Gil Ju<sup>1</sup> · Hyo Keun Oh<sup>2</sup> · Byung Wook Lee<sup>2</sup> · Hyun Ki Kim<sup>2</sup> · Deok Goo Kim<sup>3</sup>

Seung Kwan Hong<sup>1\*</sup>

1 고려대학교 건축사회환경공학부 2 용인시 상하수도 사업소 정수과 3 (주)도화엔지니어링 상하수도부

(2012년 1월 20일 접수; 2012년 4월 10일 수정; 2012년 4월 12일 채택)

### Abstract

This study assessed the removal characteristics of taste and odor causing compounds (2-methylisoborneol and geosmin) and organic matters, using a pilot-scale ozone/granular activated carbon (O<sub>3</sub>/GAC) process treating surface water of Pal-dang reservoir in the Han river over a 3-month period. Experiments were conducted to verify the removal efficiency of O<sub>3</sub>/GAC process which has two different empty bed contact time (EBCT) (O<sub>3</sub>/GAC column 1 : 10 min and 2 : 15.1 min) with 10.86 min contact time of ozonation at 1.0 mg/L O<sub>3</sub>. Spiking test using geosmin and 2-MIB was also conducted systematically to mimic the conditions when the algae appears, specifically at the levels similar to the concentrations experienced (geosmin: 250 ng/L) in the winter of 2011. In single ozonation process, organic materials, disinfection by-products (DBPs) and their precursors were disassembled but not removed completely. Meanwhile, it was verified that organic matters, taste and odor causing compounds, and DBPs were well removed when sequentially passing through the GAC process. The pilot results also showed that GAC column with larger EBCT achieved higher removal efficiency. Specifically, in spiking tests, single O<sub>3</sub> process showed approximately 89% removal efficiency of geosmin and 2-MIB. O<sub>3</sub>/GAC combined process demonstrated excellent removal of geosmin and 2-MIB, which are higher than 95%.

**Key words** : Geosmin, Granular activated carbon (GAC), Organic matters, Ozonation, 2-Methylisoborneol (2-MIB)

### 1. 서론

최근 수도권을 비롯한 여러 지역의 수돗물에서 조류 번식에 의한 악취 발생으로 인해민원이 발생하고 있다. 팔당호의 경우, 매년 20~30일의 빈도로 맛·냄새로 인한 민원이 발생하고 있으며, 2011년의 경우에는 특이하게 겨울철에도 조류가 발생하였다. 과거에는 맛·냄새 유발물질이 주로 여름철에 발생하

였으나, 최근에는 지구 온난화에 따른 이상기후로 인한 기온상승과 강수량 부족 등의 원인이 복합적으로 작용하여 동절기인 11월에도 맛·냄새유발물질이 발생하고 있다. 맛·냄새를 유발하는 대표적인 물질로는 2-MIB와 geosmin이 있는데, 사람이 수중의 geosmin과 2-MIB의 맛·냄새를 느낄 수 있는 최소감지농도는 20 ng/L이하라고 알려져 있다(Lloyd, 1998).

\*Corresponding author Tel: +82-2-929-3910, Fax: +82-2-928-7656, E-mail: skhong21@korea.ac.kr

맛·냄새 유발물질은 기존의 응집·침전·여과공정을 이용한 표준정수처리방법으로는 제거하기가 매우 어렵기 때문에(Bruce, 2002), 이러한 문제의 해결을 위하여 2015년까지 수도권 14개의 광역 정수장에 고도처리 시설이 도입될 예정이다. 이미 낙동강과 금강하류를 중심으로 한 정수장들은 과거 10년 전부터 오존 및 입상활성탄(O<sub>3</sub>/GAC)을 이용한 고도정수처리공정을 운영하고 있으며, 최근에는 한강을 원수로 하는 정수장들의 고도정수처리시설 도입이 다수 추진되고 있다. 대표적인 고도처리 방법으로는 오존처리공정(Ozonation process), 고도산화공정(Advanced Oxidation Process, AOP), 입상활성탄(Granular activated carbon, GAC)공정, 생물활성탄(Biological activated carbon, BAC)공정, 분리막여과공정(Membrane filtration)등이 있으며, 일반적으로 이러한 고도처리 공정을 기존의 표준정수처리공정 후단에 설치하여 적용하고 있다.

국내에서 O<sub>3</sub>/GAC pilot-plant를 이용하여 팔당수계 원수의 맛·냄새 및 유기물질에 대한 제거특성을 연구한 사례(임재립, 2007)를 살펴보면, pilot-plant의 운영기간이 증가할수록 O<sub>3</sub>/GAC 혼합공정이 GAC 단일공정에 비해 용존성 유기탄소(Dissolved organic carbon, DOC) 및 맛·냄새 유발물질에 대한 처리효율이 우수한 것으로 보고되었다. 그러나 활성탄 접촉조의 공탁체류시간(Empty bed contact time, EBCT)과 맛·냄새 물질의 강제투입실험에서의 농도가 다양한 조건에서 실험되지는 못하였다. 낙동강 수계의 원수를 이용하여 GAC와 BAC(Biological activated carbon)의 처리특성을 비교한 연구결과(최정우, 2000)를 살펴보면, O<sub>3</sub>/GAC pilot-plant의 EBCT를 4분에서 18분까지 조절하여 TOC, UV254 흡광도, 그리고 THMs등에 대한 최적의 EBCT조건을 선정하였다. 또한, GAC 및 BAC의 접촉조 여재층의 깊이를 20 cm~320 cm 범위의 조건으로 다양화하여 TOC, THMs, KMnO<sub>4</sub>소비량, 탁도 등을 평가하고 GAC와 BAC 반응조의 최적 층진 깊이를 결

정하였다. 그러나, O<sub>3</sub>/GAC 공정의 주 제거대상 물질중의 하나인 맛·냄새 유발물질에 대한 GAC와 BAC의 제거특성연구는 이뤄지지 않았다. GAC를 이용한 다른 연구들을 살펴보면, 유입수의 DOC 농도가 증가함에 따라 GAC에 의한 2-MIB제거효율이 감소하는데, 이는 용존성 유기물질(Dissolved organic matter, DOM)이 2-MIB가 GAC에 흡착되는 것을 방해하기 때문이다. 또한, DOC농도가 2 mg/L인 경우 3개월 정도 시간이 경과하게 되면 유기물질에 대한 파과가 발생하는 것으로 관찰되었다(Ahn, 2007). 2-MIB와 geosmin에 비하여 용존성 유기물질의 파과가 빠르게 일어나며, 용존성 유기물질들이 파과된 후에도 2-MIB와 geosmin에 대한 흡착은 계속 진행(Ho, 2010)된다는 연구 결과도 있다. 이러한 연구들을 통하여 맛·냄새 유발물질과 유기물질이 활성탄 흡착에 있어서 상호 영향을 주는 인자로 작용한다는 사실을 알 수 있다. 그 외에도 활성탄 재질에 따른 맛·냄새 유발물질의 제거 및 파과특성 비교실험(Ho, 2010)과 활성탄의 열 재생에 관한 내용(Rangel-Mendez, 2005)등, 여러 방면에서 활성탄에 대한 연구가 이루어졌다.

이와 같이 O<sub>3</sub>/GAC에 대해 많은 연구들이 보고되었으나, 다양한 농도 조건에서 O<sub>3</sub>/GAC를 이용한 맛·냄새유발물질의 제거특성 평가가 이루어지지 않았고, 맛·냄새 유발물질과 유기물질간의 제거특성에 대한 상관성 연구도 부족한 실정이다. 또한, 자연계 유기물질은 정수처리 공정에서 염소와 반응하여 소독부산물질을 형성하고, 인체에 유해한 할로젠화 물질을 생성하기 때문에(손희중, 2004), 소독부산물질 및 그 전구물질들에 대한 제거특성을 복합적으로 분석할 필요가 있다. O<sub>3</sub>/GAC 공정을 효과적으로 적용하기 위해서는 외국의 선진처리기법을 그대로 도입하기보다는 국내의 수질특성이 반영된 각 단위 공정별 제거특성 및 세부 설계인자와 운영인자에 관한 면밀한 검토가 요구된다. 즉, 제거대상 오염물질들을 효과적으로 제거하기 위해서 적정 오존 주

입농도 설정과 활성탄접촉조의 적정 EBCT 선정과 같은 설계인자를 고려한 연구가 진행될 필요가 있다는 것이다.

본 연구에서는 팔당호를 취수원으로 하는 용인정수장에서 모래여과지를 거친 원수를 O<sub>3</sub>/GAC pilot-plant를 이용하여 맛냄새 유발물질 및 유기물질의 제거특성을 파악하였다. GAC 흡착지의 EBCT 차이에 따른 오염원별 제거효율의 차이를 평가하였고, 조류 발생 시 생성되는 맛냄새 유발물질의 제거특성을 연구하기 위해서 2-MIB와 geosmin의 농도를 실제 수도권 정수장에 유입된 최대 농도범위를 고려하여 2-MIB 41~84 ng/L, geosmin 48~270 ng/L의 범위로 농도를 설정하여 강제투입실험(Spiking-test)을 실시함으로써 보다 경제적이고 효율적인 운전을 통한 맛냄새 유발물질의 제거효율을 평가하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 실험개요 및 원수의 성상

본 연구는 용인정수장의 모래여과수를 원수로 하여 O<sub>3</sub>/GAC 공정을 이용한 pilot-plant 고도정수처리 공정으로 설계하였으며, 활성탄공정의 여재 충전량의 차이를 두어 EBCT에 따른 제거효율을 비교할 수 있도록 하였다. pilot-plant 실험은 2011년 7월에 시작하여 조류가 발생하는 하절기와 장마기간을 포함한 약 4개월간 실시되었으며, 실험기간 중 원수 및 각 단위공정별 처리수의 농도를 분석하였다. 또한, 조류발생에 의해 생성되는 맛냄새 유발물질인 geosmin과 2-MIB의 제거율을 확인하기 위한 강제투입 실험을 실시하여, 2-MIB와 geosmin의 농도변화에 따른 후오존·활성탄(O<sub>3</sub>/GAC) 공정의 성능을 평가하였다. 실험기간 중 pilot-plant에 유입된 원수의 성상은 Table 1.에 나타난대로 pH는 6.53~7.87, 탁도는 0.024~0.370 NTU, 알칼리도는 15.90~56.29 mg/L의 범위로 유입되었으며, 표준정수처리

공정의 모래여과공정을 거친 물을 원수로 하였기에, pH·탁도·알칼리도의 항목에서 수질기준을 초과하는 경우는 없었다.

Table 1. Pilot-plant 유입원수의 성상

	온도 [C]	pH	탁도 [NTU]	alkalinity [mg/L as CaCO <sub>3</sub> ]
최대	27.0	7.87	0.370	56.29
최소	20.8	6.53	0.024	15.90
평균	23.7	7.13	0.057	35.09

### 2.2 실험장치 및 운전조건

Pilot-plant의 처리공정은 Fig. 1과 같이 총 2계열로 구성되어 있으며, 각 계열은 후오존(O<sub>3</sub>), 입상활성탄(GAC)처리 공정으로 구성되어있고, 각 계열별 활성탄의 충전량을 다르게 하여 EBCT에 따른 처리효율을 비교 할 수 있도록 하였다.

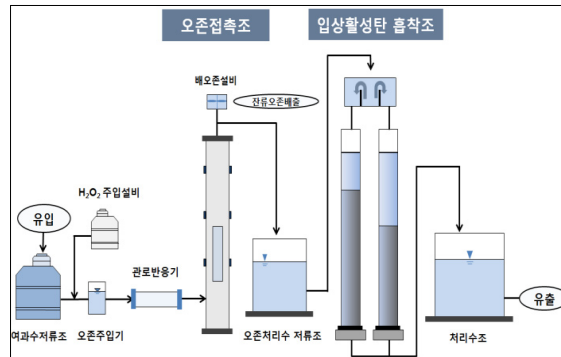


Fig 1. Pilot-plant 공정도

Pilot-plant에 유입되는 원수는 용인정수장의 모래여과지에 설치된 수중펌프에 의해 원수저류조로 이송되어 후오존 접촉조를 거친 후 GAC 1 계열과 GAC 2 계열로 분배되었다. GAC 반응조 1과 2에 동일한 수량이 분배되도록 GAC 흡착조 상부에 분배조를 설치하였으며, 각 공정별 사양은 Table 2와 같다.

Table 2. Pilot-plant 사양

공정	규격[mm]
원수저류조	Ø 1,500 × 1,700 H × 1조
후오존접촉조	Ø 310 × 6,000 H × 1조
후오존저류조	W 1,100 × L 1,000 × H 1,000 × 1조
활성탄여과조	Ø 400 × 5,500 H × 2조
활성탄접촉조	W 1,000 × L 1,000 × H 1,200 × 1조

Pilot-plant의 운전 조건을 Table 3에 나타내었다. 오존처리공정의 용량은 시료 채취에 따른 손실분을 고려하여 활성탄 공정의 유량보다 6% 많은 64 m<sup>3</sup>/day 로 운전하였고, 활성탄 공정은 설계 유량인 60m<sup>3</sup>/day 으로 운전하였으며, GAC 1 계열과 2 계열에 각각 30m<sup>3</sup>/day씩 유입량이 동일하게 되도록 운전하였다.

Table 3. Pilot-plant 운전조건

단위공정	항목	운전조건	
오존접촉 공정	시설용량	60 m <sup>3</sup> / day	
	직경	0.31 m	
	조 높이	6.0 m	
	오존 주입농도	1 mg / L	
	오존 접촉시간	10.86 min	
활성탄공정	시설용량	30 m <sup>3</sup> /day	
	직경	0.4 m	
	조 높이	5.5 m	
	여과지 면적	0.126 m <sup>2</sup>	
		GAC 1 계열	GAC 2 계열
	탄층부피	0.315 m <sup>3</sup>	0.208 m <sup>3</sup>
	탄층높이	2.5 m	1.7 m
	EBCT	15.1 min	10 min
	선속도(LV)	9.9 m /hr	
	역세척방식	물 + 공기	
역세척도	공기	0.12 m/min (15 L/min)	
	물	0.24 m/min (30 L/min)	
	Rinse	0.48 m/min (60 L/min)	
역세시간	공기	1 min	
	물+공기	3 min	
	물 Rinse	10 min	
	Drain	1 min	

오존은 1.0 ± 0.2 mg/L의 농도로 주입되도록 설정하였는데 이는 오존농도 1mg/L 이상에서 TOC 제거율의 차이가 크지 않았고, 미반응 오존 생성으로 인한 처리비 증가를 고려하여 오존농도를 결정하였다. 또한, 오존 주입률은 실제 공정에서 전력소

모량과도 밀접한 연관이 있기 때문에, C정수장의 pilot-test 결과를 참고하여 오존 접촉조의 용존오존 농도가 1.0mg/L로 자동유지 되도록 운전하였으며 오존접촉조의 접촉시간은 10.86min으로 설정하였다. 활성탄 접촉조의 EBCT는 고도정수처리 상수도 시설기준 수치범위인 5~15분을 참고하여, GAC 1 흡착조의 EBCT를 15 min으로 설정하였고, 상대적으로 작은 EBCT 조건 하에서의 제거특성을 파악하기 위하여 GAC 2 흡착조의 EBCT를 10min 으로 설정하였다. 선속도는 A/B계열 모두 동일한 9.9 m/hr으로 설계되었으며, 실험에 사용된 입상활성탄은 미국 Noritz사의 활성탄(Noritz GAC 1240)을 사용하였다. 활성탄 흡착조 내의 미분단 제거 및 안정화를 위하여 pilot-plant 설치 후 12일간 역세척을 연속적으로 시행하였고, 2011년 6월 29일부터 9월 23일까지 약 4개월간의 운영기간을 통하여 대상 항목들에 대한 제거특성을 평가 및 강제투입 실험을 진행하였다. 활성탄에 대한 주요사양은 Table 4의 내용과 같다. 활성탄 공정의 역세척은 활성탄 반응기의 수위가 가동 초기 값에 비하여 1 m 이상 증가하거나, 처리수의 탁도가 0.1 NTU 이상이 될 때 물-공기 혼합방식에 의하여 자동으로 실시되도록 설정하였다.

Table 4. 활성탄의 성상

Item	Properties	unit
Iodine number	min. 1,020	-
Molasses number(USA)	min. 230	-
Abrasion number (AWWA method)	min. 75	-
Particle size > 12 mesh (1.70 mm)	max. 5	mass %
Particle size > 12 mesh (0.425 mm)	max. 4	mass %
Moisture (as packed)	max. 2	mass %
Methylene blue adsorption	22	g / 100 g
Total surface area (B.E.T.)	1,175	m <sup>2</sup> / g
Apparent density	480	kg / m <sup>3</sup>
Density backwashed and drained	420	kg / m <sup>3</sup>
Ball-pan hardness	97	-
Uniformity coefficient	1.6	-
Ash content	7	mass %
Water soluble ash	0.1	mass %
pH	Alkaline	-
Dechlorination having value	2.5	cm

### 2.3 항목별 수질분석 방법

Pilot-plant 실험을 통하여 원수 및 각 공정별 처리수의 탁도, pH, 수온, 알칼리도는 주6회 측정하였고, geosmin, 2-MIB, DOC, TOC, UV<sub>254</sub>, KMnO<sub>4</sub>, SUVA, THMs, HAAs, THMs-FP, HAAs-FP 항목은 주 1회 측정하였다. 본 실험의 모든 분석은 먹는 물 수질공정시험법과 Standard method 시험법에 따라 이루어졌으며, 항목별 수질 분석방법 및 분석기기에 대한 세부사항은 Table 5에 나타내었다.

Table 5. 항목별 분석방법 및 분석기기

분석항목	분석방법	분석기기
수온	직접측정법	수온측정기
pH	전위차법	pH-meter
탁도	탁도계 사용	HACH-2100AN Turbidimeter(HACH)
알칼리도	수질오염공정시험법	-
TOC	Ultraviolet and photocatalyst	TOC Analyzer(SHIMADZU)
DOC		DR 5000 Spectrophotometer (HACH)
UV <sub>254</sub> 흡광도	Standard method	Spectrophotometer (HACH)
KMnO <sub>4</sub> 소비량	적정법	-
THMs THMs-FP	퍼지트랩 분석법	Tekma 3000 P&T Agilent 5975c GC/MS
HAAs HAAs-FP	LLC-기체크로마토그래피	Varian cp-3800 GC/ECD
Geosmin 2-MIB	SPME-GC/MS법	GC(7890A)/MS(5975C) (Agilent Technologies)

### 2.4 강제투입 실험방법

오존 및 활성탄 공정의 맛·냄새 유발물질의 제거 효율 평가를 위하여 원수 저류조에 geosmin과 2-MIB를 투입하여 일정 농도가 되도록 원수와 혼합한 후, O<sub>3</sub>/GAC 공정의 체류시간을 고려하여 최초 가동 직후와 20분, 40분 후의 원수, O<sub>3</sub>공정, O<sub>3</sub>/GAC 1 공정 및 O<sub>3</sub>/GAC 2 공정의 처리수를 채수하였다. 채수한 각 공정 별 처리수의 geosmin과 2-MIB의 농도를 측정하여 그에 따른 처리효율을 평가하였으며, Table 6과 같이 강제투입 농도를 변경하며 총 5회(1회/1일)에 걸쳐서 실험을 수행하였다.

Fig. 2는 2011년 11월과 12월 중 서울시 6곳의 정수장으로 유입되었던 원수 중 맛·냄새 유발물질의 최대농도를 나타내고 있는데, 실험에서 설정한 농도 조건 (2-MIB: 41~84 ng/L, geosmin: 48~270 ng/L)이 실제로 유입된 geosmin의 최대농도 조건과 유사함을 알 수 있다.

Table 6. 강제투입 실험조건

항 목	실 험 조 건	
	2-MIB [ng/L]	Geosmin [ng/L]
Geosmin · 2-MIB 표준용액농도	41	48
	62	65
	55	128
	68	173
	84	270
후오존 주입농도	1.05 mg/L	
표준용액 주입시간	1 시간	
채수시간	최초 가동 직후 · 최초 약품 투입 20분후 · 40분후	

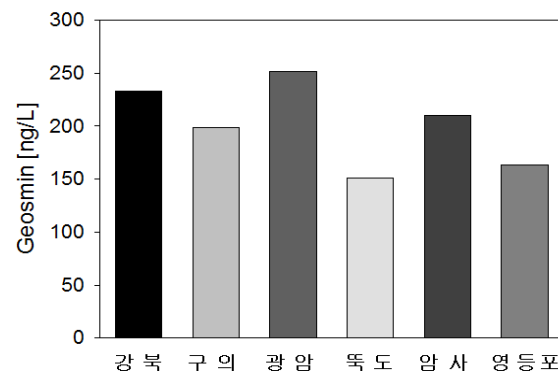


Fig 2. 서울시 정수장의 맛·냄새 유발물질 최대 유입농도 (자료 출처 : 서울시 상수도 연구원, 2011년 11월 ~ 12월)

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 맛·냄새 유발물질의 제거특성 분석

2-MIB와 geosmin은 인체에 해롭지는 않지만 (Dionigi, 1993), 수중에 극히 미량 존재 하더라도 맛·냄새를 유발하게 되는 심미적 영향물질로써, 원수로 사용되는 지표수에서 조류가 발생되었을 시 주로 생성된다. 기존의 연구들에서 O<sub>3</sub>/GAC공정을

이용한 맛·냄새유발물질에 대한 제거특성에 관한 내용이 다루어졌지만, 본 연구에서는 2-MIB와 geosmin의 다양한 농도별 단위 공정의 제거효율을 파악함으로써, 실제 공정에서 고농도의 맛·냄새 유발물질이 유입 되었을 때 pilot-plant의 처리특성을 파악하고자 하였다.

본 실험기간 동안 pilot-plant로 유입된 원수의 geosmin과 2-MIB 농도는 사람이 느낄 수 있는 역치농도인 10ng/L 이하(0~9 ng/L)로 관찰되었다. 이는 pilot-plant 가동기간이 조류 발생 가능성이 높은 하절기임에도 불구하고, 실험기간 중 계속적으로 발생한 집중호우와 장마로 인하여 조류가 발생하지 않았기 때문이다. 유입된 geosmin과 2-MIB는 오존·활성탄 공정에 의해 2ng/L 이하로 제거되었으나, 제거율을 평가하기에는 유입농도가 매우 낮았다. 따라서 2-MIB와 geosmin의 다양한 농도조건에서 제거효율을 평가하기 위해 강제투입실험을 수행하였다. 강제투입 실험에서의 각 물질별 농도는 2-MIB 41~84 ng/L, geosmin 48~270 ng/L의 범위로 설정하였다.

Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에서 2-MIB 주입 후 20분과 40분 후의 각 단위공정의 농도별 제거효율을 나타내었다. 2-MIB는 O<sub>3</sub> 단일공정에서 85%이상의 제거효율을 보였으며, 2-MIB의 농도가 증가할수록 그 제거율이 다소 낮아지는 경향을 보였다. O<sub>3</sub>/GAC 1 공정과 O<sub>3</sub>/GAC 2 공정의 제거효율을 비교하면, 활성탄의 EBCT가 큰 O<sub>3</sub>/GAC 1 공정의 제거효율이 EBCT가 작은 O<sub>3</sub>/GAC 2 공정에 비하여 다소 낮은 경향을 보였으나, 전체적으로 유사한 것으로 관찰되었다. Table 7에 2-MIB 유입농도별 유출수의 단위 공정별 처리농도를 나타내었다. Table 7의 결과를 통해 알 수 있듯이, O<sub>3</sub> 단일공정에서 고농도의 2-MIB가 유입되어도 9ng/L 이하로 제거되었고, O<sub>3</sub>/GAC 1 공정과 O<sub>3</sub>/GAC 2 공정을 거치게 되면 거의 모든 양의 2-MIB 물질이 (2ng/L 이하) 효과적으로 제거됨을 확인 할 수 있다.

Table 7. 2-MIB 유입농도에 따른 단위공정별 유출농도

분류	2-MIB [ng/L]	단위공정		
		유입농도	O <sub>3</sub>	O <sub>3</sub> + GAC 1
20분 후 농도	41	3	0	0
		40분 후 농도	2	0
20분 후 농도	62	5	0	0
		40분 후 농도	5	0
20분 후 농도	55	5	1	2
		40분 후 농도	3	1
20분 후 농도	68	7	1	2
		40분 후 농도	6	2
20분 후 농도	84	9	2	2
		40분 후 농도	7	2

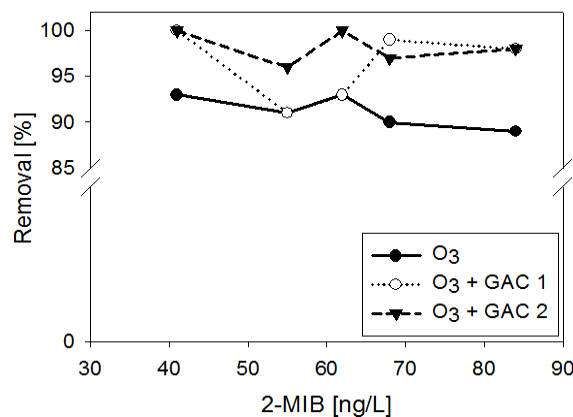


Fig 3(a). 2-MIB 농도에 따른 단위공정별 제거효율 (20분 후 채수)

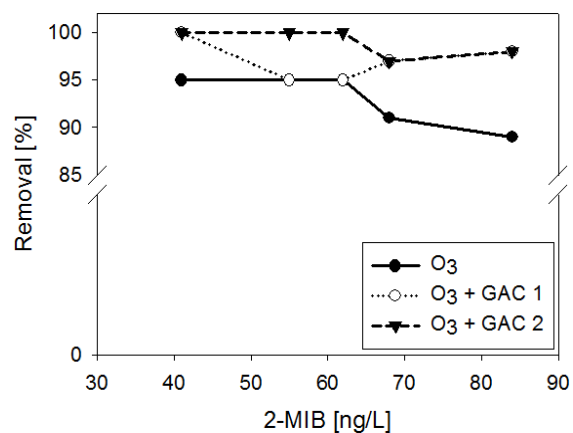


Fig 3(b). 2-MIB 농도에 따른 단위공정별 제거효율(40분 후 채수)

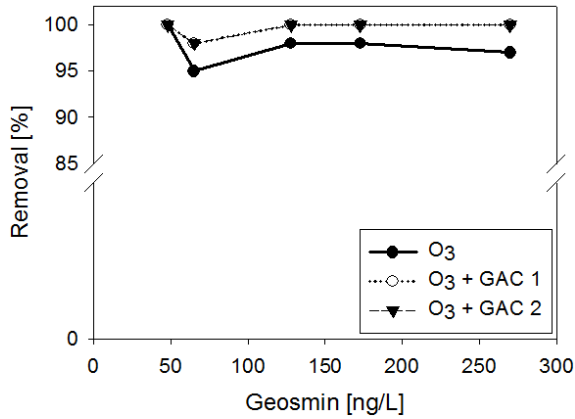


Fig 3(c). geosmin 농도에 따른 단위공정별 제거효율 (20분 후 채수)

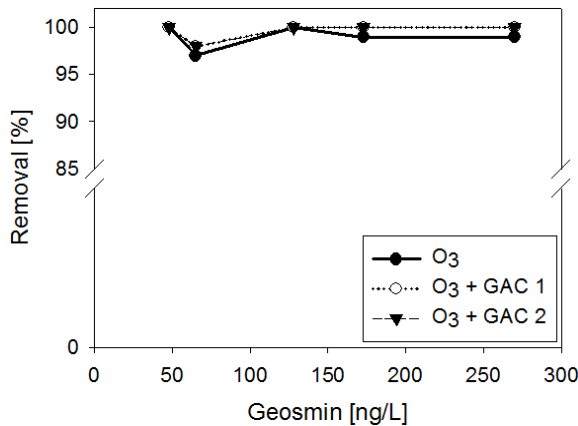


Fig 3(d). geosmin 농도에 따른 단위공정별 제거효율 (40분 후 채수)

Fig. 3(c)와 Fig. 3(d)에서 geosmin 주입 후, 20분과 40분 후의 각 단위공정에서의 농도별 제거효율을 나타내었다. geosmin의 경우, O<sub>3</sub> 단일공정에서 geosmin의 주입농도에 관계없이 평균 95% 정도의 높은 제거효율을 나타내었으며, EBCT의 차이는 관계없이 O<sub>3</sub>/GAC 1 공정과 O<sub>3</sub>/GAC 2 공정에서 모두 동일한 제거효율을 나타내는 경향을 보였다. Table 8에 나타난 geosmin 유입농도별 유출수의 단위공정별 처리농도결과를 통해 이러한 결과들을 수치로써 확인 할 수 있다. Table 8의 결과를 통해서 보면, O<sub>3</sub> 단일공정에서 고농도의 geosmin이 유입되어도 8ng/L 이하로 제거됨을 확인 할 수 있

으며, O<sub>3</sub>/GAC 1 공정과 O<sub>3</sub>/GAC 2 공정을 거치게 되면 거의 모든 양의 geosmin 물질이 (1ng/L 이하) 효과적으로 제거되었다. 본 연구에서 수행된 강제투입 실험을 통하여, O<sub>3</sub> 단일공정 처리수의 geosmin과 2-MIB의 농도가 9ng/L 이하(85% 제거효율)로 제거되었고, GAC 공정을 거치면서 대부분 2ng/L 이하의 농도로 효과적으로 제거되는 경향을 보였다. 이는 본 연구에서 설정한 O<sub>3</sub>/GAC공정의 설계조건이 맛냄새물질이 고농도로 유입되는 경우에도 효과적으로 맛냄새 물질을 제거할 수 있음을 의미한다.

Table 8. geosmin 유입농도에 따른 단위공정별 유출농도

분류	Geosmin [ng/L]	Geosmin [ng/L]		
		유입농도	O <sub>3</sub>	O <sub>3</sub> + GAC 1
20분 후 농도	48	0	0	0
40분 후 농도		0	0	0
20분 후 농도	65	3	1	1
40분 후 농도		2	1	1
20분 후 농도	128	2	0	0
40분 후 농도		0	0	0
20분 후 농도	173	3	0	0
40분 후 농도		2	0	0
20분 후 농도	270	8	0	0
40분 후 농도		4	0	0

### 3.2 용존성 유기물질의 제거특성 및 맛냄새 유발 물질과의 상관성 분석

최근의 연구결과에 따르면, 조류 내 유기물질성분(Algae organic matter, AOM)이 소독부산물(Disinfection by-products, DBPs)과 맛냄새물질(MIB)의 생성에 영향을 미친다(Li, 2012). AOM 내의 유기물 성분 중 1mg의 탄소가 약 68.75 ng의 MIB물질을 생성하는데, 실제공정에서도 유기물과 맛냄새 유발물질이 가지는 상관성에 대한 연구가 필요하다. 서론부분에서 언급한대로, O<sub>3</sub>/GAC 공정을 이용하여 팔당수계의 원수 중 DOC 및 UV<sub>254</sub> 흡광도의 제거특성에 관한 연구가 있었으나, O<sub>3</sub>/GAC

공정의 유기물질에 대한 제거특성과 및 파과특성에 대한 연구만이 이루어졌고, 맛·냄새 유발물질과의 상관관계에 있어서도 각 물질의 흡착 및 제거 특성에 관한 연구만이 이루어졌다. 따라서 각 단위공정별로 유기물질의 직접적인 양을 나타내는 측정항목인 DOC, TOC를 비롯하여, 난분해성 유기물질의 동향을 파악할 수 있는 UV<sub>254</sub>흡광도와 유기오염물질의 양을 측정할 수 있는 지표인 과망간산칼륨소비량, 수중에 존재하는 용존성 유기물의 특성을 파악할 수 있는 SUVA값과 맛·냄새 유발물질과의 관계분석을 통하여, 맛·냄새 유발물질과 다양한 분석항목으로 측정된 유기물질간의 상관성을 평가하였다.

Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 O<sub>3</sub>/GAC pilot-plant 운전 기간동안 원수와 O<sub>3</sub>/GAC 1 공정에서의 DOC 및 TOC의 농도를 나타낸 결과이다. 공정 가동기간 중 원수단계에서의 용존성 유기물질은 0.978~2.196 mg/L, 총 유기탄소는 0.993 mg/L~1.688mg/L의 농도범위로 유입되었고, TOC와 DOC가 O<sub>3</sub>/GAC 1 공정을 거치면서 수질기준 이하의 농도인 1mg/L 이하로 제거됨을 알 수 있다. 또한, pilot-plant의 운영기간이 길어짐에 따라, 유기물질에 대한 제거효율도 점차 안정화 되어 처리수의 농도가 점차 낮아지는 모습을 확인 할 수 있다.

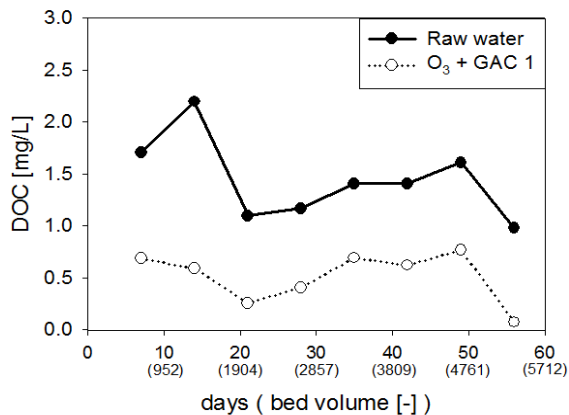


Fig 4(a). 원수 및 O<sub>3</sub>/GAC 1 공정에서의 DOC 농도변화

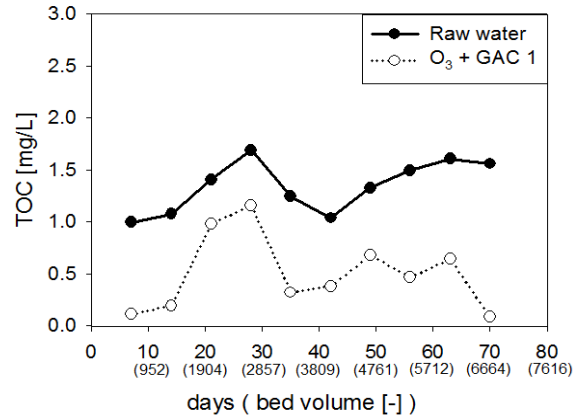


Fig 4(b). 원수 및 O<sub>3</sub>/GAC 1 공정에서의 TOC 농도변화

Fig 5(a)는 O<sub>3</sub> 단일공정에서의 각 항목별 평균 제거효율을 나타내었으며, Fig 5(b)와 Fig 5(c)에서 O<sub>3</sub>/GAC 1 공정과 O<sub>3</sub>/GAC 2 공정에서의 각 항목별 평균 제거효율을 나타내었다. Fig 5(a)를 보면, 오존 단일공정에서는 TOC, DOC 및 UV<sub>254</sub>흡광도 등 유기물질 항목들에 대한 제거율이 크지 않음을 알 수 있다. 이는 오존처리가 유기물질의 직접적인 제거보다는 분해 기작이 주로 작용하여 유기물질의 총량의 변화에는 큰 영향을 주지 않은 것으로 판단되며, O<sub>3</sub> 공정에서 분해된 유기물은 흡착에 의한 제거 기작이 주로 작용하는 활성탄 처리공정을 거치면서 약 60~80%의 효율로 제거됨을 Fig 4(b)와 Fig 4(c)를 통해 알 수 있다. 각 단위공정별 SUVA값의 변화를 보면, O<sub>3</sub> 단일공정에서 SUVA값이 약 20%정도 감소하였는데, 이는 수중 유기물질들 중 상대적으로 큰 분자량을 가지는 유기물질들과 소수성을 띠는 물질들이 제거되었다는 것(Edzwald, 1999)을 의미한다. 또한, O<sub>3</sub>/GAC 1 공정에서의 제거율이 약 40% 정도로 크게 상승한 경우를 볼 수 있는데, 이는 오존 공정에서 분해된 유기물 성분이 활성탄공정을 거치면서 소수성을 띠는 대상 유기물질들이 제거되었음을 알 수 있다.



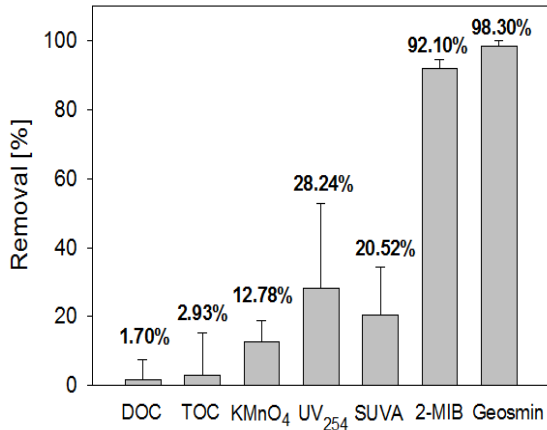


Fig 5(a). O<sub>3</sub> 공정에서의 각 항목별 제거효율

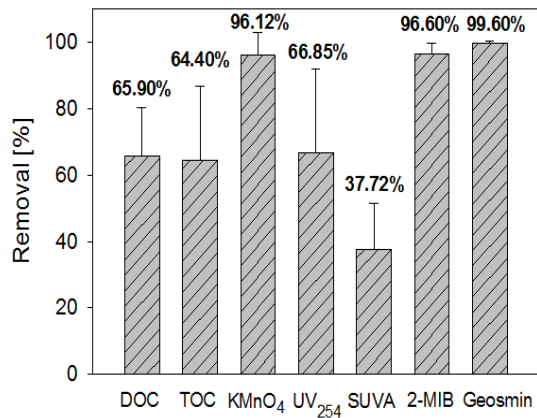


Fig 5(b). O<sub>3</sub>/GAC 1 공정에서의 각 항목별 제거효율

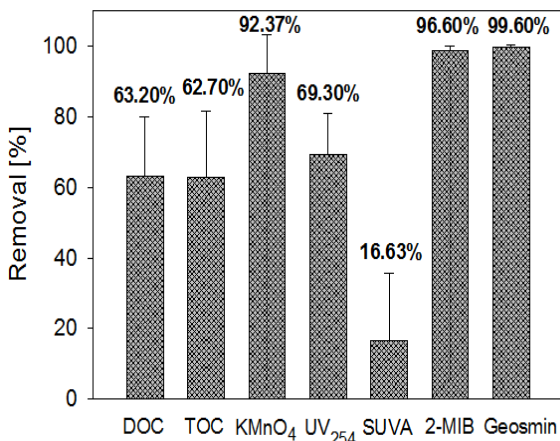


Fig 5(c). O<sub>3</sub>/GAC 2 공정에서의 각 항목별 제거효율

Fig 5에서 O<sub>3</sub> 단일공정으로 유기물을 제거하기는 어려우나, 2-MIB와 geosmin에 대한 제거율은 높았

다는 것을 알 수 있다. 이는 각 단위 공정별 유기물질들과 맛·냄새 유발물질에 대한 제거율 측면에서 판단해 보았을 때, O<sub>3</sub> 단일공정에서는 유기물과 맛·냄새 물질간의 작용한 주요기작이 달랐기 때문에 제거율 측면에서 상관성을 보이지 않는 것으로 판단된다. 반면, O<sub>3</sub>/GAC 공정에서는 활성탄의 흡착기작에 의하여 유기물질과 맛·냄새 물질이 효과적으로 제거되는 결과를 보였기 때문에, 흡착에 의한 제거기작에 있어서 유사한 상관성을 보인다는 것을 알 수 있다.

O<sub>3</sub>/GAC 반응조의 EBCT에 대한 차이를 살펴보면, 상대적으로 활성탄 접촉조의 EBCT가 큰 O<sub>3</sub>/GAC 1 계열이 O<sub>3</sub>/GAC 2 계열에 비해 모든 항목에서 소폭 높은 제거율을 보였는데, 이는 유기물질들이 반응조 내에 머무르는 시간이 길수록 활성탄의 흡착에 의해 더 많은 양이 제거되었음을 의미한다.

### 3.3. O<sub>3</sub>/GAC 공정의 소독부산물 제거특성 평가

활성탄 공정을 이용한 맛·냄새 유발물질 및 유기물에 대한 연구와 더불어 O<sub>3</sub>/BAC 공정을 이용한 THMs (Trihalomethanes)에 대한 제거특성(최정우, 2000)과 HAAs(Haloaceticacids)에 대한 제거특성(손희중, 2008) 등 정수처리공정 중 발생하는 소독부산물 제거에 대한 연구결과가 지속적으로 보고되고 있다. 이러한 연구들은 EBCT, 수온 등 여러 인자들을 고려하여 소독부산물의 제거효율을 평가하였지만, 실제 O<sub>3</sub>/GAC pilot-plant를 이용한 각 단위공정 내에서의 소독부산물(THMs와 HAAs)과 그 전구물질들(THMs-FP, HAAs-FP)에 대한 제거경향을 복합적으로 파악한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 O<sub>3</sub> 단일공정과 O<sub>3</sub>/GAC 1 공정 및 O<sub>3</sub>/GAC 2 공정에서의 단위공정별 소독부산물의 제거특성을 분석하였다.

Fig 6(a)는 O<sub>3</sub> 단일공정에서의 소독부산물의 평균제거율을 나타낸 결과이다. THMs와 THMs-FP는 오존 단일공정에서의 제거율이 높지 않음을 알 수

있는데, 이는 오존공정에서 물질에 대한 직접적인 제거보다는 분해 기작이 우세하게 작용하여 나타난 결과이다. HAAs와 HAAs-FP의 경우, 오존공정을 거치면서 오히려 그 양이 증가하는 경향을 보였다. 일반적으로 오존에 의해 HAAs의 농도는 감소하지만, 본 실험에서는 전염소처리 과정을 포함한 표준 정수처리공정의 모래여과 처리수를 원수로 사용하였기 때문에, 원수 중 염소가 소량 남아있게 되어 오존처리과정에 있어서 HAAs와 HAAs-FP의 증가에 영향을 미친 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 6(b)와 Fig. 6(c)의 결과에서 알 수 있듯이, 오존공정에서 분해된 소독 부산물들이 활성탄공정을 거치면서 효과적으로 제거됨을 확인 할 수 있다. 또한, Fig 5(b)와 Fig 5(c)의 결과를 비교하여 보면, 상대적으로 활성탄의 EBCT가 큰 O<sub>3</sub>/GAC 1 공정이 O<sub>3</sub>/GAC 2 공정에 비하여 모든 소독부산물질 항목에 대한 제거율이 높음을 알 수 있다. 이는 활성탄의 EBCT가 클수록 소독부산물질이 활성탄 흡착조 내에 머무르는 시간이 길어짐으로써, 흡착에 의한 제거량이 더 많아짐을 의미한다.

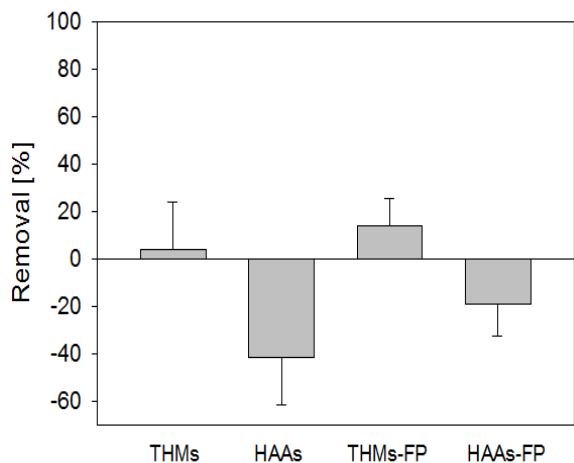


Fig 6(a). O<sub>3</sub> 공정에서의 소독부산물질 제거효율

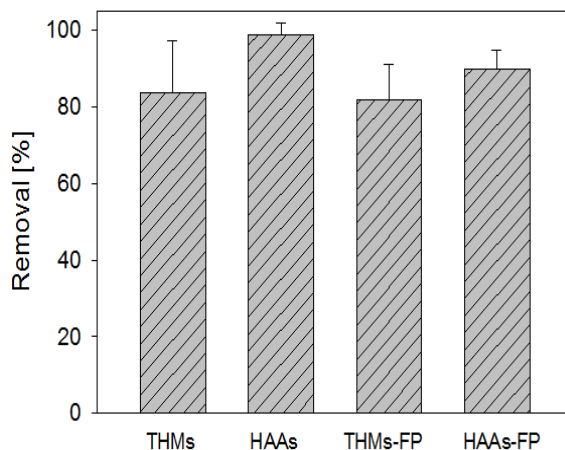


Fig 6(b). O<sub>3</sub>/GAC 1 공정에서의 소독부산물질 제거효율

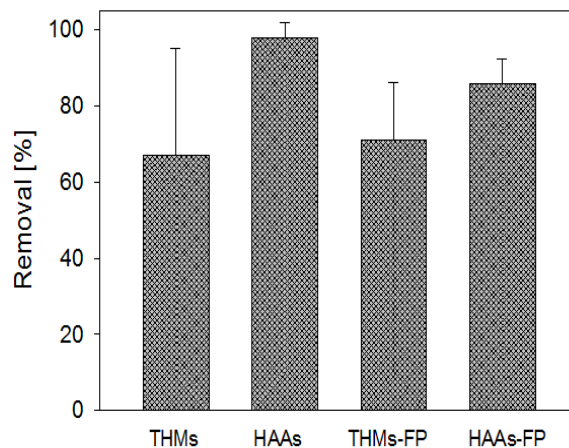


Fig 6(c). O<sub>3</sub>/GAC 2 공정에서의 소독부산물질 제거효율

#### 4. 결론

팔당호를 원수로 사용하는 용인정수장의 오존/입상활성탄 공정의 처리특성에 관한 pilot-plant 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 강제투입실험을 통하여 평가한 맛·냄새 유발물질의 처리효율은 유입농도와 체류시간에 관계없이 오존 단일공정에서 85% 이상의 높은 제거율을 나타내었고, 오존/활성탄 공정을 거치면서 92% 이상의 제거율로 맛·냄새 유발물질이 제거되었다. 상대적으로 2-MIB에 비하여 geosmin에 대한 제거율이



높았으며, geosmin에 대해서는 활성탄의 EBCT의 차이에 관계없이 O<sub>3</sub>/GAC 1 공정과 O<sub>3</sub>/GAC 2 공정이 동일한 제거성능을 나타내었다. 처리수의 농도는 O<sub>3</sub>/GAC 공정에서 두 종류의 맛·냄새 유발물질 모두 2ng/L 이하를 나타내었는데, 이는 겨울철에 발생한 특이농도 이상의 수준으로 맛·냄새 유발물질이 유입되더라도 본 pilot-plant의 O<sub>3</sub>/GAC 공정을 통해 이들을 효과적으로 제거할 수 있음을 의미한다.

2. 오존 단일공정에 있어서 유기물질에는 오존이 주로 분해기작으로 작용하였고, 맛·냄새 유발물질에는 분해기작과 제거기작이 동시에 작용하기 때문에 제거율에 있어서 상관성을 보이지 않았다. 그러나 O<sub>3</sub>/GAC 공정에 있어서는 유기물질과 맛·냄새 유발물질 모두 오존에 의한 분해기작과 활성탄에 의한 흡착기작이 동시에 작용하였기에, 두 물질 모두 높은 제거효율을 보이는 유사성을 나타내었다.

3. 오존 단일공정에서 소독부산물의 제거율이 낮거나 오히려 그 양이 증가하는 경향을 보였다. 이는 오존에서 우세하게 작용한 분해기작에 의한 것이며, 분해되거나 생성된 소독부산물이 GAC공정을 거치면서 흡착에 의해 효과적으로 제거되는 결과를 보였다. 또한, 활성탄의 EBCT가 클수록 소독부산물에 대한 제거효율이 다소 높은 결과를 보였는데, 이는 활성탄 흡착조 내 소독부산물이 활성탄과 흡착될 기회가 많아짐으로써 나타난 결과로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 환경부 “차세대 에코이노베이션 기술 개발사업(GT-11-G-02-001-1)”으로 지원 받은 과제입니다.

### 참고문헌

손희종, 유수전, 유평종, 정철우 (2008) BAC공정에서 EBCT와 수온에 따른 HAA제거특성, 대한환경공학회지, 30(12), pp. 1255-1261

손희종, 정철우, 강임석 (2004) 상수원수중의 천연유기물질 특성과 염소 소독부산물 생성의 관계, 대한환경공학회지, 26(4), pp. 457-466

임재립, 이경혁, 김성수, 채선하 (2007) 한강수계 고도정수처리 공정에서의 유기물과 맛·냄새의 제거특성, 대한상하수도학회지, 21(1), pp. 13-25

최정우, 현길수, 강용태 (2000) 정수수질 개선을 위한 입상활성탄과 생물활성탄의 처리특성, 한국물환경학회지, 16(2), pp. 191-198

Bruce D., Westerhoff P., and Brawley-Chesworth A. (2002) Removal of 2-methylisoborneol and geosmin in surface water treatment plants in Arizona Journal of Water Supply, 51, pp. 183-197

Dionigi C.P., Lawlor T.E., McFarland J.E., Johnsen P.B. (1993) Evaluation of geosmin and 2-methylisoborneol on the histidine dependence of TA98 and TA100 Salmonella typhimurium tester strains. Water Research 27 pp. 1615-1618

Ahn H., Chae S, Kim S., Wang S., Summers R.S. (2007) Efficient taste and odour removal by water treatment plants around the Han River water supply system. Water Science & Technology 55 pp.103-109

Edzward J.K., Tobiasson J.E., (1999) Enhanced coagulation: US requirements and a broader view, Water Sci, Technol., 40(9), pp. 63-70

Lei L, Gao N., Deng Y., Yao J., Zhang K. (2012) Characterization of intracellular & extra cellular algae organic matters (AOM) of microcystic aeruginosa and formation of AOM-associated disinfection byproducts and odor & taste compounds, Water Research doi:10.1016/j.watres.2011.12.026

Ho L., Newcombe G. (2010) Granular Activated Carbon Adsorption of 2-Methylisoborneol(MIB): Pilot-and Laboratory-Scale Evaluations. Journal of Environmental Engineering 965

Lloyd S.W., Lea J.M., Zimba P.V., Grimm C.C. (1998) Rapid analysis of geosmin and 2-methylisoborneol in water using solid phase micro extraction procedures Water Research 32 pp. 2140-2146

Rangel-Mendez J.R., Cannon F.S. (2005) Improved activated carbon by thermal treatment in methane and steam: Physicochemical influences on MIB sorption capacity. Carbon 43 pp. 467-479